

专题: 二维转角莫尔超晶格

莫尔晶格中的激子绝缘体

古杰^{1)†} 马立国^{2)‡}

1) (复旦大学物理系, 应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

2) (康奈尔大学应用物理系, 伊萨卡 14850)

(2023 年 1 月 16 日收到; 2023 年 2 月 9 日收到修改稿)

当载流子动能被抑制后, 双层量子阱中的电子-空穴可以通过层间库仑相互作用形成激子绝缘体, 而抑制动能的主要手段为施加外部磁场产生朗道能级. 在二维莫尔晶格中通过能带折叠可以显著抑制载流子动能进而形成莫尔平带. 本文主要介绍通过莫尔平带实现无外加磁场的激子绝缘体, 着重介绍几个不同的实验思路, 并展示如何利用差分反射谱、层间激子光致发光谱、2s 激子探测谱、量子电容以及微波阻抗谱探测激子绝缘体信号. 总的来说, 莫尔晶格中形成的激子绝缘体为在固体环境中研究 Bose-Hubbard 模型提供了很好的平台, 其研究内容可包括激子莫特绝缘体、激子超流以及它们之间的连续转变等.

关键词: 激子绝缘体, 莫尔晶格, 平带, 二维半导体**PACS:** 71.35.Lk, 71.27.+a, 71.35.-y, 73.21.Cd**DOI:** 10.7498/aps.72.20230079

1 引言

激子绝缘体的理论发展于 20 世纪 60 年代早期^[1-5], 当时凝聚态体系刚刚诞生了超导的 BCS 理论, 它描述的是电子-电子配对 (库珀对) 问题, 该理论非常成功地解释了常规超导体的诸多性质, 比如超导带隙随转变温度的关系、迈斯纳效应等. 同期研究者们通过对半导体的发光研究, 已经认识到直接带隙半导体中价带的空穴与导带的电子会束缚在一起形成激子并辐射复合发光, 其发出的光子能量小于半导体的能带带隙, 二者之差便是激子的束缚能. 伴随着 BCS 理论的成功, 与之相关的一个疑问便是: 如果电子与电子可以配对形成库珀对超流, 那么电子-空穴是否也能配对形成电子-空穴对 (激子) 超流? 因为超导的转变温度与库珀对的束缚能相关, 在常规超导体中, 该束缚能在 1 meV 量级, 而半导体中激子的束缚能往往在 10—100 meV

的量级, 那么激子超流其转变温度理论上可以发生在室温! 然而前面所提到的半导体中的激子由于辐射复合或其他衰减渠道 (如俄歇效应) 的存在, 其寿命往往低于 1 ns, 因此很难形成足够高的密度来研究激子凝聚, 那么是否有体系能够存在无衰减的激子呢? 通过理论发现^[1,3,4], 在一些小带隙的半导体中, 如果激子的束缚能够超过其带隙, 那么该体系的单粒子能带会由于存在电子-空穴的相互吸引而表现得不稳定 (图 1(a)), 最终自发出现电子-空穴对并打开一个关联能隙; 这种关联能隙也有可能存在于某些半金属的材料中 (图 1(a)), 研究者们把这一类自发出现电子-空穴对的材料统称为激子绝缘体. 在低温下, 激子绝缘体可发生相变形成玻色爱因斯坦型 (BEC 型) 的激子凝聚或者 BCS 型的激子凝聚, 前者主要发生在激子浓度较低的区域 (激子束缚能较强), 而后者发生在激子浓度较高的区域 (激子束缚能较弱). 激子绝缘体的候选者有诸如 Ta_2NiSe_5 , $1T\text{-TaSe}_2$, WTe_2 , InAs/GaSb 等,

† 通信作者. E-mail: gujielog@fudan.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: liguo.ma@cornell.edu

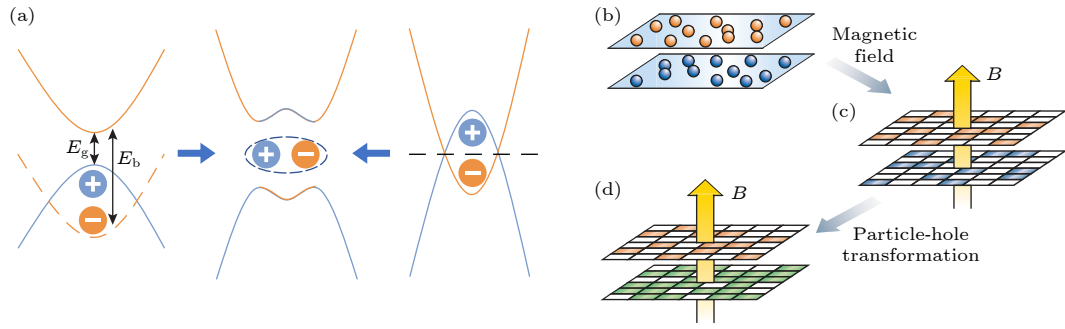


图 1 激子绝缘体产生示意图 (a) 左, 半导体带隙 E_g , 激子束缚能 E_b , 当 E_b 大于 E_g 时, 单粒子能带结构在电子-空穴吸引作用下表现得不稳定; 右, 半金属有着负的带隙, 黑色虚线表示费米能, 同样在电子-空穴的吸引下能带结构不稳定, 二者都可能自发形成激子并打开一个关联能隙; (b)–(d) 一个电子-电子的双层结构在纵向磁场中等价于一个电子-空穴双层结构^[18]; (b) 电子处于平行的上下两层中的示意图; (c) 在磁场中电子的动能量子化到一系列分立的朗道能级, 每个朗道能级包含若干简并的电子圆形轨道, 这里用方格子代表轨道; 当磁场足够强时, 所有电子都集中在最低朗道能级并且是部分填充 (图中为 1/3 填充); (d) 在下面一层中进行粒子-空穴转换, 此时原先空的格点等价于空穴占据 (图中绿色格点), 原先两层的电子-电子库仑排斥在此变换后等价于两层的电子-空穴库仑吸引, 当两层电子空穴数目一致的时候 (各自都半填充最低朗道能级), 最有可能发生激子的玻色爱因斯坦凝聚 (图中展示的是电子-空穴不相等的情况)

Fig. 1. Schematic for exciton insulator formation: (a) Left, a semiconductor with bandgap E_g and exciton binding energy E_b , when E_b is larger than E_g , the single particle band structure is not stable under electron-hole attraction; right, a semimetal with a negative bandgap, black dashed line indicates the Fermi level. Similarly, under electron-hole attraction, the band structure is not stable. Both will spontaneously form exciton and open a correlation gap. (b)–(d) An electron-electron bilayer system in a strong magnetic field is equivalent to an electron-hole bilayer^[18]. (b) Cartoon depiction of two parallel layers of electrons. (c) In a magnetic field the kinetic energy of 2D electrons is quantized into discrete Landau energy levels. Each such Landau level contains a huge number of degenerate orbitals, here depicted schematically as a checkerboard of sites. If the field is strong enough, all electrons reside in the lowest Landau level, and only occupy a fraction (here one-third) of the available sites. (d) A particle-hole transformation applied to the lower electron layer places the emphasis on the unoccupied sites—that is, the holes (colored green) in that layer. This transformation changes the sign of the Coulomb interactions between layers from repulsive to attractive. Exciton BEC is most likely to occur when the number of electrons and holes are equal, that is, when each layer is half-filled (this is not the case in this figure).

研究者们通过光电能谱^[6]、等离子激元软化^[7,8]、量子输运^[9,10]、增大压强^[11]及红外光谱^[12]等进行了丰富的研究, 但这些材料关于激子凝聚的实验支撑还未出现^[13,14]. 在探索无衰减的激子过程中, 研究者们发现了另外一个途径, 如果能够将电子和空穴空间上分置到相邻的双层量子阱结构中, 中间通过介电材料隔开防止电子-空穴复合, 当中间层厚度足够薄以至于电子-空穴的相互吸引能量远远超过电子-空穴各自在层中的动能时, 这样一个由电子-空穴吸引相互作用占主导的体系便有可能自发形成激子. 研究者们最开始在双层砷化镓量子阱中实现了这样的电子-空穴双层结构^[15–17], 然而为了抑制其电子-空穴的动能需要施加纵向的磁场, 当双层砷化镓都处于最低朗道能级的半填充时, 体系自发形成电子-空穴对 (其中一层需要进行粒子-空穴转换 (图 1(b)^[18])). 并且该体系能够通过一系列电输运的测量方法观察到激子超流的现象, 比如完美的库仑拖拽 (perfect Coulomb drag)、量子化的拖拽霍尔电阻、零耗散的回流电流 (counter-flow current)、约瑟夫森型的隧穿电流等^[16–19]. 相比于

1T-TaSe₂, WTe₂等材料体系, 电子-空穴双层体系具有更丰富的实验现象, 因此成为研究激子绝缘体的重要分支. 近年来二维材料体系的发展对该领域的研究也有显著的促进作用^[20,21]. 比如在石墨烯-氮化硼-石墨烯结构中, 当氮化硼厚度约为 3 nm 时, 两层石墨烯中的电子-空穴可以通过相互吸引形成激子^[22,23], 并且该体系通过栅极电压可以很容易调控各自的载流子浓度, 研究者们甚至可以观察到 BEC 到 BCS 的转变^[24]. 然而这类双层体系都需要外加磁场产生朗道平带来抑制载流子的动能, 那么是否有办法无需外加磁场也可以产生平带呢? 这就是本文主要讨论的问题, 本文将展示利用莫尔平带在双层体系中实现无磁场情况下的激子绝缘体.

2 莫尔平带

近年来在实验室中快速发展的二维材料转移工艺使得研究者们能够制备出高质量的堆叠结构, 比如把两层石墨烯或过渡金属硫族化合物 (TMD) 相对转动一定角度, 或者将有一定晶格不匹配的

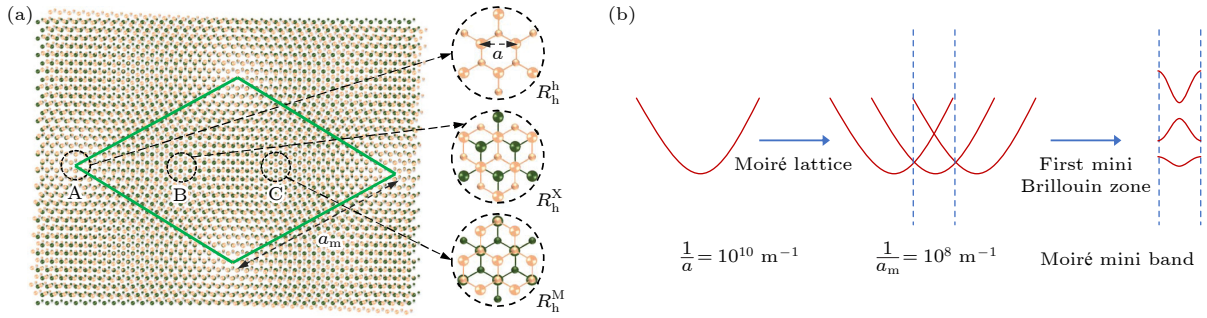


图 2 莫尔平带 (a) 在 TMD 异质结中形成的莫尔晶格^[25], 其中 A, B, C 三个位置是莫尔格点中的高对称点, a_m 为莫尔周期, 其上下层原子堆叠情况参照右边的放大示意图 (此图为转角 0° 附近); (b) 在形成莫尔晶格后, 布里渊区从原来的 $1/a$ (10^{10} m^{-1}) (a 为原子间距) 折叠为 $1/a_m$ (10^8 m^{-1}), 形成迷你布里渊区, 在其边界通过布拉格反射打开能隙, 形成莫尔平带

Fig. 2. Moiré flat band: (a) Moiré lattice formed in TMD heterobilayer. A, B, C are three high symmetry points in the moiré unit cell^[25], here a_m is the moiré lattice period. And the zoomed in lattice configuration was shown on the right (this is a zero-angle twist case). (b) After having moiré lattice, the Brillouin zone shrinks from the original $1/a$ ($\sim 10^{10} \text{ m}^{-1}$) (a is the original distance between neighboring atoms) to $1/a_m$ ($\sim 10^8 \text{ m}^{-1}$), forming mini Brillouin zone. This opens a gap at its boundary due to Bragg reflection followed by the emergence of moiré flat band.

两层材料堆叠在一起, 可以形成长周期的莫尔晶格 (图 2(a)^[25]), 其莫尔周期 a_m 的表达式为: $a_m = a/\sqrt{\theta^2 + \delta^2}$, 其中 a 为原先单层的晶格长度, θ 为两层材料相对转动角度 (弧度单位), δ 为两层晶格不匹配程度 (百分比). 由莫尔晶格导致的能带折叠可以显著减小单粒子的动能至 $\pi^2 \hbar^2 / (2m^* \cdot a_m^2)$ (图 2(b)), 形成莫尔平带, 其中 m^* 为电子的有效质量, \hbar 为普朗克常数. 从实空间的图像来看, 通常情况下莫尔晶格中的某一个高对称点会有较强的莫尔势来限制粒子, 使得粒子的瓦尼尔轨道局域在该莫尔格点上. 由于粒子的动能 t 被抑制, 电子之间的关联便可能占主导进而出现较强的关联现象. 通常研究者们会使用莫尔晶格中的电子 (本节中均使用电子, 空穴与之等价) 填充数目 ν 来描述电子的浓度, 比如在 $\nu = 1$ 时, 每个莫尔格点有且仅有一个电子, 当再注入额外的电子时, 无论该电子被注入到哪个格点上, 总会感受到来自于那个格点中已存在的电子的排斥, 从而需要克服一定的能量 U 才能顺利注入, 这也就是莫尔晶格在 $\nu = 1$ 会有电子关联带隙的原因. 人们通常称 U 为格点排斥能, 而 $\nu = 1$ 的带隙为莫特带隙, 莫特带隙上 (下) 能支为第二 (一) Hubbard 能带. 实际上早在 2010 年, 罗格斯大学 Andrei 课题组^[26] 就在转角石墨烯中通过扫描隧道谱观察到了在费米面附近的范霍夫奇点; 2011 年, 奥斯汀大学 Bistritzer 和 MacDonald^[27] 理论预言了当两层石墨烯相对转动一定角度过后, 在某些特定的“魔角”, 会产生莫尔平带. 2017 年, MacDonald 课题组和香港大学姚望课题组^[25,28] 预

言在 TMD 莫尔材料中也存在有效的莫尔周期势. 紧接着在 2018 年麻省理工大学的 Jarillo-Herrero 组^[29,30] 成功观察到了转角石墨烯在 1.1° 魔角附近由莫尔平带产生的电子强关联态. 之后在石墨烯和 TMD 二维体系中, 一系列与莫尔晶格和平带相关的实验现象相继被发现^[31-151], 包括量子反常霍尔效应^[54,120]、广义 Wigner Crystal 态^[56,72,98,103,110]、连续 Mott 相变^[108,109] 等.

3 莫尔晶格中的激子绝缘体

引言中提到, 研究者们已经在石墨烯-氮化硼-石墨烯这样的二维堆叠结构中研究过激子绝缘体^[22,23], 那么直观的印象便是将莫尔晶格引入这个体系, 由于莫尔平带的作用, 其形成的激子绝缘体很有可能是不需要外加磁场的. 那能否将该结构中的上下两层石墨烯分别替换成转角石墨烯的莫尔结构呢? 这看似很直接的实验构思在实现起来却颇有难度^[152], 原因是转角石墨烯的强关联现象只发生在很小的一段角度区间内 (“魔角” $\pm 0.1^\circ$), 这会带来两个困扰: 一是比较难精确控制角度, 二是可能发生晶格弛豫, 使得原本精确的转角弛豫到无法预测的角度. 并且由于存在面内不均匀的张力, 这类弛豫往往会导致最终的莫尔晶格周期在空间上不均匀分布, 随之而来的问题便是上下两层莫尔结构的周期也将不匹配, 无法有效形成层间激子. 上述原因导致双莫尔石墨烯晶格的制备非常困难. 而 TMD 异质结的莫尔体系正好可以弥补这样的缺憾. 由于

TMD 异质结是通过晶格失配形成的莫尔结构, 异质结中的两层材料在微小转动角度 ($\pm 2^\circ$) 下其莫尔周期不会发生太大的变化, 从而表现出非常稳定的电子关联现象. 并且由于 TMD 材料在可见或近红外有着非常明显的光学激子响应, 使得通过光学手段来研究该体系的关联效应成为可能, 比如通过激子探测研究关联绝缘态^[72], 通过磁光效应研究莫尔晶格的 Hubbard 模型模拟以及条纹像的空间分布等^[57,103]. 下文将主要介绍通过 TMD 异质结的莫尔平带来实现激子绝缘体.

3.1 单层 TMD-薄氮化硼-TMD 莫尔结构 (简称单层-莫尔结构)^[153,154]

最近几乎同时由加州伯克利大学的 Wang 课题组^[153] 和康奈尔大学的 Mak、Shan 课题组^[154] 率先发现在 WSe_2 -hBN- WSe_2/WS_2 结构中有存在激子绝缘体的证据. 该结构由单层 WSe_2 和 WSe_2/WS_2 莫尔晶格组成, 中间层 hBN 的厚度为 2—3 层, 其

中形成激子的过程与引言中提及的上下电子空穴双层结构类似 (图 1(b)), 也是主要考虑总的粒子数占据 $\nu = 1$ 的情况 (即每个莫尔格点填充一个粒子)(图 3(a)). 此时第一 Hubbard 能带为全占据, 对应于引言中的最低朗道能级全占据, 并且二维体系可以比较方便地通过纵向电场来调节单层与莫尔晶格中的粒子数占比. 当莫尔晶格中空穴占据数为 $1 - \nu'$, 而单层 WSe_2 中的空穴数刚好为 ν' (总占据数为 1) 时, 与有磁场的情况类似, 在莫尔晶格的第一 Hubbard 能带中进行粒子-空穴转换, 则正好有 ν' 的电子占据. 此时上下两层的空穴与电子数目刚好匹配, 可以完美配对束缚在一起形成激子 (图 3(a)), 此时激子的浓度 $\nu_x = \nu'$. 并且由于单层 WSe_2 和 WSe_2/WS_2 莫尔结构的价带在零电场下挨得很近 (图 3(b)), 在小电场范围内 (0.2 V/nm) 便可以实现能带交叉, 调节电场等价于调节体系的激子浓度, ν_x 理论上的可调范围值为 0—1. 在单激子极限下, 可以预估激子的束缚能约为莫尔晶格的

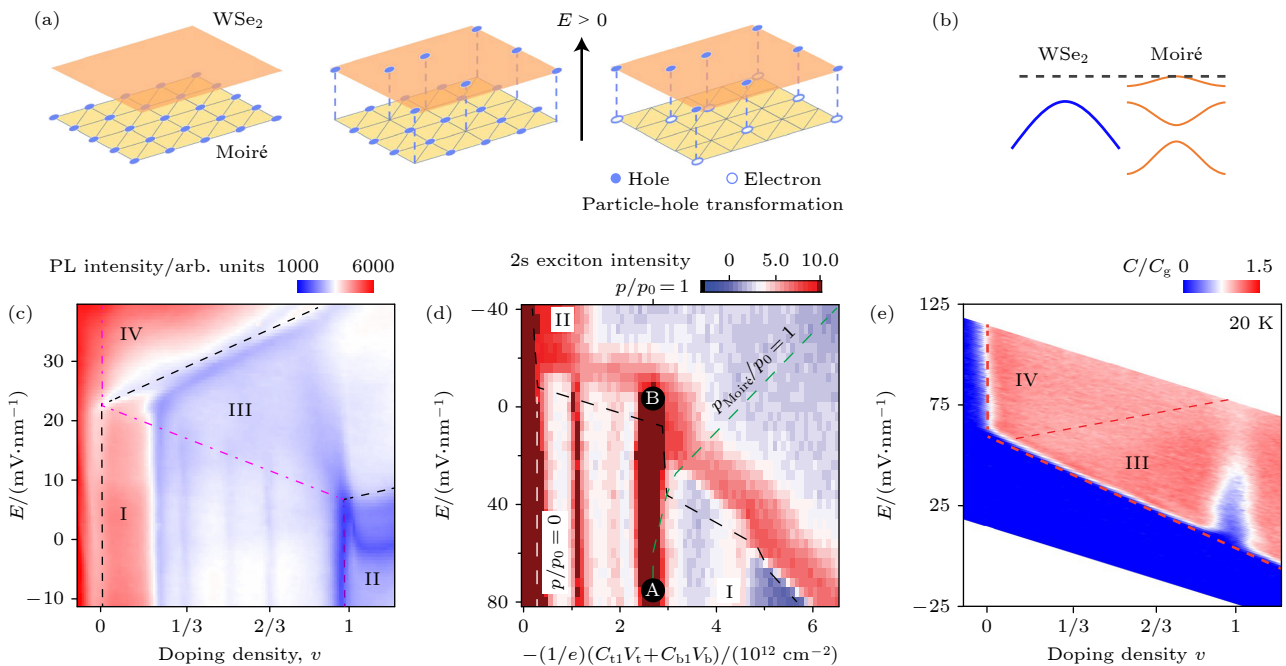


图 3 单层-莫尔结构中的激子绝缘体^[153,154] (a) 该结构中的粒子-空穴转换示意图; (b) 单层 WSe_2 与莫尔异质结在不加电场时的能带相对位置示意图, 其中黑色虚线代表费米能; (c)–(e) 莫尔异质结层间激子光致发光强度 (c), 激子探测手段中的 2s 态强度 (d), 以及穿透电容 (e) 随电场和电荷浓度的变化. 其中穿透电容可以清楚看到在区域 III (单层与莫尔晶格都同时被掺杂了的区域), 在总的浓度为 1 的时候, 连续调节电场改变体系激子浓度 (浓度范围 ν_x 为 0—0.7), 体系始终有带隙

Fig. 3. Exciton insulator in monolayer-hBN-moiré structure^[153,154]: (a) Schematic for particle-hole transformation in this system; (b) band alignment between monolayer WSe_2 and moiré heterobilayer without electric field, black dashed line indicates the Fermi level; (c)–(e) photoluminescence intensity from moiré interlayer exciton (c), exciton sensor's 2s intensity (d) and penetration capacitance (e) as a function of electric field and dope. The penetration capacitance clearly shows in region III, where both monolayer and moiré are doped and when total filling is at 1, the system is always gaped when continuously tune the exciton density ($\nu_x \sim 0-0.7$) by varying the electric field.

莫特带隙, 大小约为 50 meV^[113]. 原因是在单激子情况下, 该激子存在的格点在破坏电子-空穴的束缚后, 单层 WSe₂ 中离散的空穴需要游离到该格点之外的某个位置, 但是该位置下面的莫尔格点都被空穴占据 (因为体系的总占据数 $\nu = 1$), 因此离散的空穴依然会感受到来自于下方格点中空穴的排斥能, 当氮化硼厚度 (1 nm) 远小于莫尔周期 (8 nm) 时, 此排斥能约为格点排斥能 U . Mak、Shan 课题组^[154] 通过莫尔层间激子的光致发光光谱, Wang 课题组^[153] 通过 2s 激子探测的方式发现 (图 3(c) 和图 3(d)) 在总电荷密度 $\nu = 1$ 时, 如果空穴全部在莫尔晶格中, 系统自然表现出莫特绝缘体的性质, 但是当施加电场连续的将空穴转移到单层 WSe₂ 的过程中, 系统一直有处于绝缘态的迹象, 这表明无法将单层 WSe₂ 和莫尔结构独立考虑. 因为当不考虑二者的层间库仑相互作用同时, 单层 WSe₂ 在掺杂一定浓度的空穴后, 其一定表现出导体的性质, 同样莫尔结构也如此 (除去特殊的几个浓度之外, 比如占据数为 1/3, 1/2, 2/3), 因此系统无法在连续调节 ν' (ν_x) 的时候都表现出绝缘体的特性. 除非将二者的层间库仑作用考虑进来, 形成稳定的激子束缚态, 因为激子是中性粒子, 因此系统表现出绝缘体的特点, 连续调节电场仅仅是在调节激子的浓度, 并不会影响系统的绝缘性质. Mak、Shan 课题组^[154] 还通过量子穿透电容定量测量了体系的带隙 (图 3(e)), 他们发现在低激子浓度下的带隙接近于莫尔晶格的关联带隙, 都约为 50 meV, 并随着激子浓度 ν_x 增大, 该带隙会减小直到 ν_x 约为 0.7 时, 该体系发生激子的莫特转变进入电子-空穴的等离子区间, 伴随着带隙也消失.

3.2 单层 TMD-双层 TMD 结构 (简称单层-双层结构 (图 4(a)))

单层-双层结构中莫尔晶格产生于单层与双层的界面处, 双层中的另外一层会独立出来, 因此该结构可以看成是单层-莫尔结构, 但与之前的结构不同的是, 单层-双层结构中去除了中间层的 hBN, 因此其电子-空穴的吸引能进一步提高, 如果能够抑制其层间的隧穿, 那么该结构也有可能形成激子绝缘体. 该设想最近由伦斯勒理工学院的 Shi 课题组^[155] 实现, 他们将单层 WS₂ 和双层 WSe₂ 以无转

角的方式堆叠在一起, 观察到了激子绝缘体的证据. 由于 WS₂ 的价带离 WSe₂ 非常远, 因此低能量的空穴只掺杂到双层 WSe₂ 中, 并且两层 WSe₂ 中的空穴浓度分布也可以通过电场来调控, 如图 4(a) 所示. 由于自然形成的双层 WSe₂ 中存在自旋-谷锁定及其相对 180° 转角特性, 层间隧穿会被显著抑制^[156], 因此两层 WSe₂ 中空穴的库仑相互作用等价于前面介绍的单层-莫尔结构. Shi 课题组^[155] 发现在莫尔晶格与单层之间总的空穴浓度为 1 的时候, 连续调节上下两层 WSe₂ 的空穴浓度, 系统会有接近于绝缘态的光学响应 (图 4(b)), 此现象与前面提到的单层-莫尔结构中的一致, 是为激子绝缘体. 最后他们通过微波阻抗 (MIM) 的测量, 也证实了系统的确处于带隙之中 (图 4(c)).

3.3 单层 TMD-双层 TMD-单层 TMD 结构 (简称双莫尔结构)

在所有的结构中, 双莫尔结构应该是理论上最容易实现零场下激子绝缘体的体系. 如果把引言中提及的石墨烯-氮化硼-石墨烯结构中的石墨烯都替换成莫尔晶格, 此时上下层都具备平带的特点, 电子空穴受限在莫尔格点中, 将具备更强的相互作用. 最近由康奈尔大学的 Zeng 等^[157] 在单层 WS₂-双层 WSe₂-单层 WS₂ 中构造出了双莫尔结构, (图 4(d)), 该结构可以看作是 WS₂/WSe₂ 和 WSe₂/WS₂ 两个莫尔晶格的叠加, 如果只考虑体系掺杂电子的情况, 这些电子会聚集在上下两层 WS₂ 中 (体系的能带排列如图 4(e) 所示), 而中间的双层 WSe₂ 正好可以作为介质层阻止电子的隧穿. 通过控制电场可以控制电子在两个莫尔晶格之中的比例, 该实验组观察到的证据为在 $\nu = 1$ 的时候, 当连续改变两个莫尔晶格中的电子浓度时, 系统一直处于绝缘态 (通过额外一层 WSe₂ 2s 激子探测)(图 4(f)), 这与前面提到的单层-莫尔结构和单层-双层结构中观察到的现象一样, 不同之处是这个体系由于上下莫尔晶格对称性的原因, 体系的激子浓度 ν_x 最多为 1/2, 所以没有观察到激子的莫特等离子转变. 另外, 该课题组还发现在总的电子浓度为分数时 (2/3, 4/3 等), 体系在连续改变两层莫尔晶格浓度比例时, 体系依然处于绝缘态, 此时系统处于激子密度波相, 它打破了莫尔晶格的平移对称性, 如图 4(g) 所示.

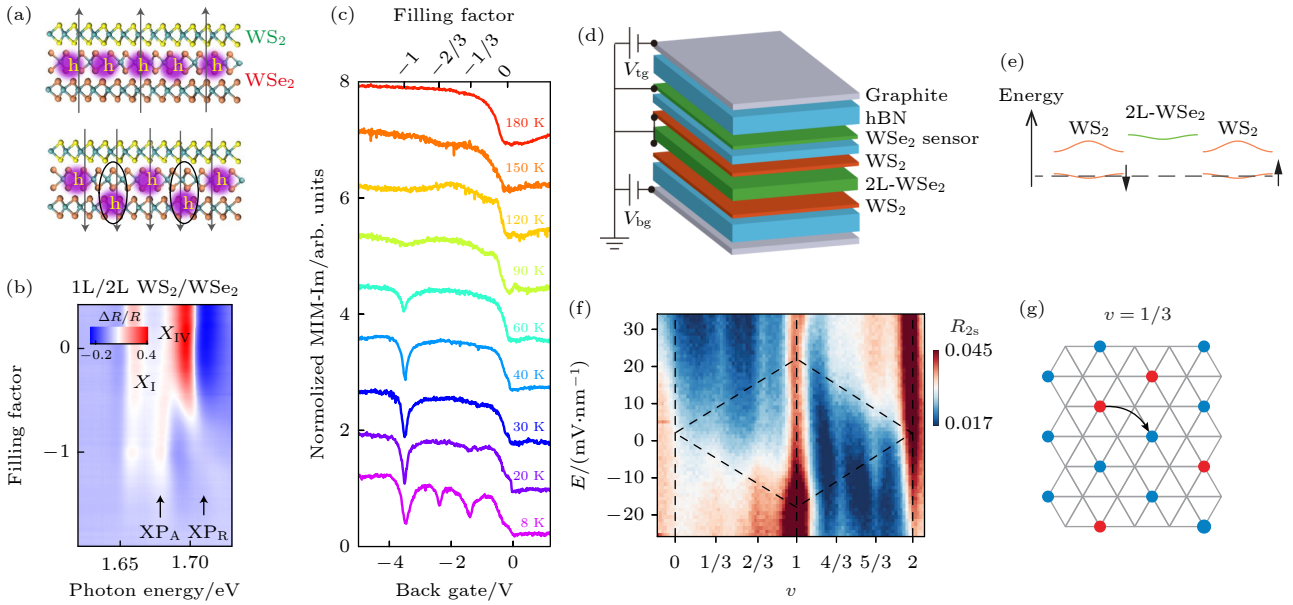


图4 单层-双层结构中 (a)–(c)^[155] 以及双莫尔结构中 (d)–(g)^[157] 的激子绝缘体 (a) 电场调控空穴在两层 WSe_2 中的分布, 电场向上时 (上图), 空穴全部分布于靠近莫尔晶格的那层 WSe_2 , 当电场向下时 (下图), 空穴可以被转移到最下层 WSe_2 中, 并且与上层中的空位 (电子) 束缚在一起形成激子; (b) 扫描背向栅极电压调控两层空穴比例, 在总的浓度为 1 的时候出现绝缘态的性质; (c) 通过 MIM 测量到体系在 $\nu = 1$ 的确处于绝缘态, 其带隙在 120 K 消失; (d) 双莫尔结构样品示意图, 最上层 WSe_2 用于 2s 激子探测; (e) WS_2 -2L WSe_2 - WS_2 导带能带排列; (f) 2s 激子反射强度随电场 E 和电子浓度 ν 的变化关系; (g) 激子密度波示意图, 在总的电子浓度 $\nu = 1/3$ 时, 红 (蓝) 色点表示上 (下) 层莫尔晶格中的电子, 激子在晶格中移动时会被限制在 $1/3$ 的格点中 (如图中箭头所示)

Fig. 4. Exciton insulator in monolayer TMD-bilayer TMD structure (a)–(c)^[155] and in double moiré structure (d)–(g)^[157]: (a) Electric field tunes hole distribution in both WSe_2 layers, when it points upward (upper picture), holes are all located in the moiré WSe_2 layer, when it points downward (lower picture), holes can be transferred to another WSe_2 layer. Those holes can bond with vacancies (electron) in the moiré to form excitons. (b) Back-gate dependent reflection spectrum. Insulator behavior emerges at total filling 1. (c) MIM showing the insulator state at $\nu = 1$ has a gap equivalent to 120 K. (d) Double moiré sample schematic, the top most WSe_2 layer is used for 2s exciton sensing. (e) Conduction band alignment in WS_2 -2L WSe_2 - WS_2 structure. (f) 2s reflection amplitude as a function of electric field E and electron density ν . (g) Exciton density wave schematic. At total electron filling $\nu = 1/3$, the red (blue) dots represent charges in top (bottom) moiré, exciton hops only under the $1/3$ lattice (as shown by the black arrow).

4 其他 TMD 体系中的激子绝缘体^[158]

前面介绍了有莫尔晶格的双层库仑相互作用体系中的激子绝缘体, 这里面莫尔晶格的主要作用是提供平带以产生较强的激子束缚, 进而实现零磁场下的激子绝缘体. 如果单从平带来看, 平带也就意味着载流子有效质量大, 实际上单层 TMD 材料其载流子有效质量约为 $0.5m_0$ ^[159] (m_0 为电子质量), 远远大于石墨烯 (狄拉克费米子有效质量约为 0) 或者传统的 GaAs 体系^[160] (有效质量约为 $0.06m_0$), 通过理论计算得知激子绝缘体的带隙与其有效质量是成正相关的^[161,162], 因此, 在有较大有效质量的单层 TMD-薄氮化硼-单层 TMD (简称单层-单层结构) 中, 当两层距离足够小的时候, 层间电子-空穴的库仑束缚能也有可能主导于其层内的载流子动能, 进而实现较强的电子-空穴关联, 产

生激子绝缘体. 该设想在不久前被康奈尔大学的 Shan 和 Mak 课题组^[158] 证实. 他们研究的体系为单层 MoSe_2 -氮化硼-单层 WSe_2 , 如图 5(a) 所示. 单层 MoSe_2 和单层 WSe_2 形成 type-II 的能带对齐, MoSe_2 (具有相对更低的导带) 中容纳的电子和 WSe_2 (具有相对更高的价带) 中容纳的空穴可以形成层间激子. 这里氮化硼厚度约为 5–6 层, 在此厚度下层间载流子隧穿可以忽略不计, 从而避免系统中的层间激子处于非平衡态^[163]. Shan 和 Mak 课题组^[158] 使用一个巧妙的设计, 实现了对该体系中电子、空穴以及电子-空穴对 (激子) 的良好电接触. 他们通过在其中一个单层上施加的偏压将电子层与空穴层的化学势分开, 同时利用栅极电压控制体系的平均化学势来调节 MoSe_2 和 WSe_2 的能带相对电极电势的位置, 进而注入电子 (MoSe_2)-空穴 (WSe_2), 如图 5(b) 和图 5(c) 所示. 在栅极电压

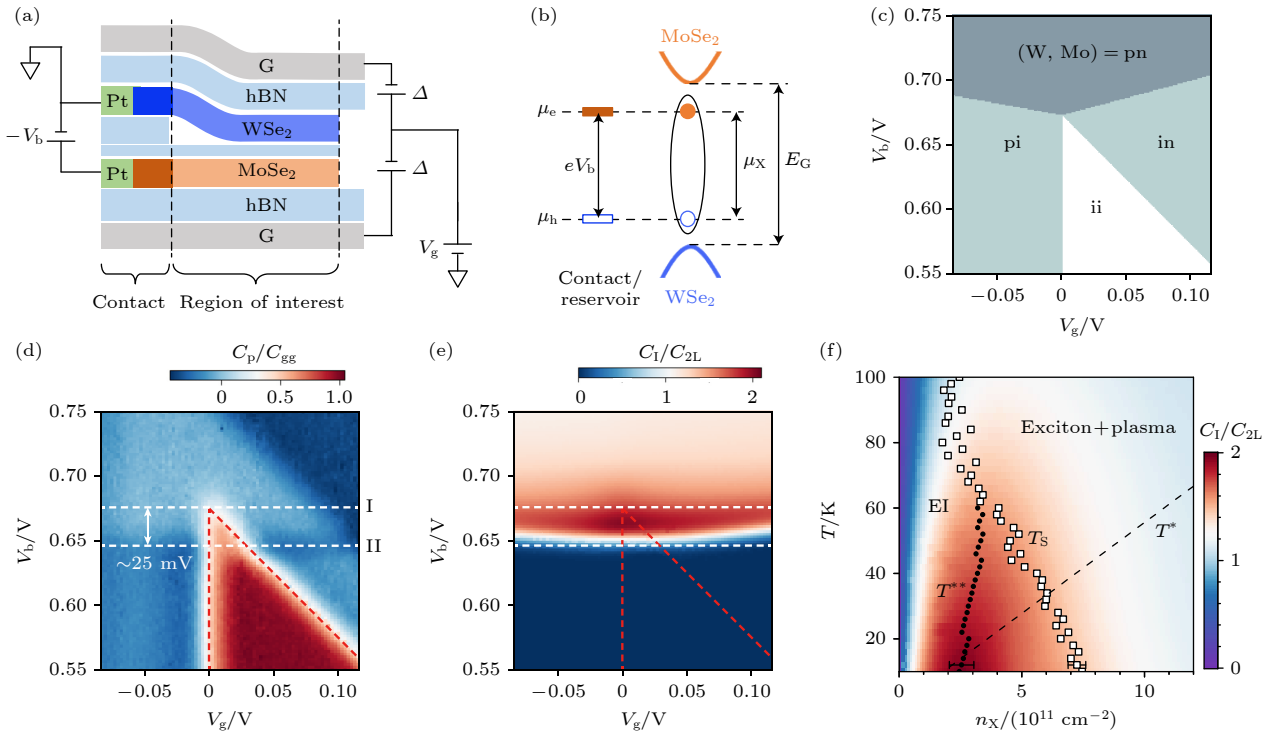


图 5 单层-单层结构中的激子绝缘体^[158] (a) 样品结构示意图, V_b 和 V_g 分别代表施加的偏压和栅压, Δ 为额外施加的面外电场 (以产生高掺杂的接触区域); (b) 能带和化学势相对位置示意图, 其中 μ_e , μ_h , μ_X 分别代表电子、空穴、激子的化学势, E_G 是系统的带隙; (c) 静电相位图 (忽略层间激子耦合), 其中 p, n, i 分别代表空穴、电子掺杂和本征状态; (d), (e) 穿透电容 (d) 和层间电容 (e) 随偏压 V_b 和栅压 V_g 的变化关系; 穿透电容 (d) 观测到的绝缘区域 (红色) 与层间电容 (e) 观测到的电子-空穴对可注入区域 (红色) 重叠的部分 (白色虚线与红色虚线围出的三角区域) 指示了激子绝缘体的存在; (f) 激子绝缘体相图

Fig. 5. Exciton insulator in monolayer-monolayer structure^[158]: (a) Sample schematic in which V_b and V_g represent bias voltage and gate voltage, respectively; (b) band diagram of the device in which μ_e , μ_h and μ_X represent chemical potential of electron, hole and exciton, respectively; E_G is the band gap; (c) electrostatic phase diagram in which p, n, i represent hole, electron doped and intrinsic layers, respectively; (d), (e) penetration capacitance (d) and interlayer capacitance (e) as a function of bias V_b and gate V_g ; the charge insulating region indicated by penetration capacitance (red in (d)) and electron-hole pair injectable region measured by interlayer capacitance (red in (e)) has an overlap, which is the triangle region surrounded by red and white dashes; that indicates the existing of excitonic insulator; (f) thermal-dynamic phase diagram of interlayer excitons in the system.

和偏压的控制下, 可使得系统中的电子和空穴数目相等. 通过穿透电容 (图 5(d)) 和层间电容 (图 5(e)) 的测量, 该课题组发现在某个特定偏压区域 (图 5(d) 和 5(e) 两条白色虚线之间), 当穿透电容表现出绝缘性质的时候, 层间电容依然有极强的信号, 这表明体系出现了激子, 穿透电容的绝缘信号表明激子不导电, 而层间电容的信号表明激子是可以被注入的 (具有压缩性). 这提供了系统处于激子绝缘态的直接热力学证据.

5 展望

在前面介绍的几个 TMD 体系中, 研究者们仅仅观察到了激子绝缘体存在电荷带隙的证据, 证明了激子的存在, 但是体系是否处于激子超流这样的宏观相干态仍然是个还未回答的问题. 为了要观察

此类现象, 需要借助在引言中提到的激子运输的实验方法来验证 (如图 6 所示). 对比前面不同的产生激子绝缘体的结构, 其中单层-双层的结构在样品制备环节最为容易, 然而由于单层-双层直接接触, 很难开发基于此类结构的电运输测量; 双莫尔结构理论上最容易实现激子宏观相干态, 但是由于其样品制备过程中的不确定因素 (转角不均匀、晶格错位), 目前还比较难对其进行进一步的实验开发; 单层-单层的结构由于没有莫尔势的帮助, 其实现激子绝缘体的温度要低于其他结构. 相比之下, 单层-莫尔结构不仅具备比较高的激子绝缘体转变温度, 并且在制备库仑拖拽电极上也具有可行性, 因此开发此类结构的电运输测量是未来探索莫尔体系中激子相干态的重要方向. 当然, 从样品制备的角度来看, 如果能够开发出比较干净的 TMD 异质结生长的办法, 那么产生比较理想的双莫尔结构将不

再是梦想. 另外莫尔体系的激子还有更多有趣的物理现象等待人们去探索, 其中之一为通过激子研究 Bose-Hubbard 模型^[164,165]. 由于激子受限在莫尔格点中, 如果考虑激子与激子之间的相互作用, 通过将激子类比于电子, 人们自然可以联想到是否可以观察到激子的莫特绝缘体, 广义的激子维格纳态(激子固体), 以及激子从超流到莫特绝缘体转变的过程等. 最近有工作初步涉及到了这方面的研究^[166,167], 期待未来有更多精彩的实验现象待研究者们去发掘.

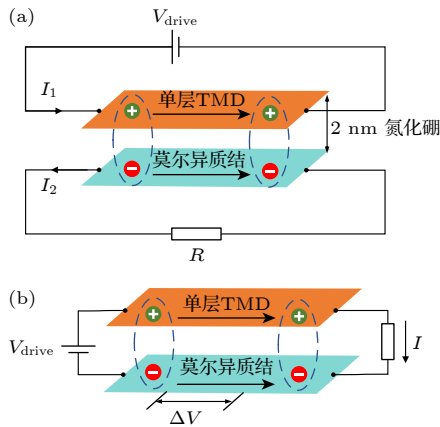


图6 激子电输运实验示意图 (a) 库仑拖拽实验: 单层 TMD 与莫尔异质结晶格之间有 2 nm 的氮化硼中间层, 单层 TMD 和莫尔异质结分别处于不同回路, 在单层 TMD 中施加电流 I_1 , 测量在莫尔异质结中的拖拽电流 I_2 , 这里莫尔异质结回路没有外加电流源, 激子形成宏观相干态后, $I_1 = I_2$, 并且回流实验 (b) 观测到没有耗散的层内电流 ($\Delta V = 0$)

Fig. 6. Exciton transport experiment: (a) Coulomb drag measurement. Monolayer TMD and moiré structure are separated by a 2 nm hBN and they are in different circuits. A driving current I_1 is in the monolayer TMD circuit and the drag current in moiré circuit can be measured, here moiré circuit is not connected with any external source. When exciton superfluidity forms, $I_1 = I_2$ and longitudinal voltage drop of counter-flow configuration shown in (b) should be $\Delta V = 0$.

参考文献

[1] Mott N F 1961 *Philos. Mag. J. Theor. Exp. Appl. Phys.* **6** 287
 [2] Blatt J M, Böer K W, Brandt W 1962 *Phys. Rev.* **126** 1691
 [3] Knox R S 1963 *Theory of excitons* (New York: Academic Press) p100
 [4] Jérôme D, Rice T M, Kohn W 1967 *Phys. Rev.* **158** 462
 [5] Lou W K, Chang K 2022 *Physics* **51** 303 (in Chinese) [娄文凯, 常凯 2022 物理 **51** 303]
 [6] Wakisaka Y, Sudayama T, Takubo K, Mizokawa T, Arita M, Namatame H, Taniguchi M, Katayama N, Nohara M, Takagi H 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 026402

[7] Kogar A, Rak M S, Vig S, Husain A A, Flicker F, Joe Y I, Venema L, MacDougall G J, Chiang T C, Fradkin E, van Wezel J, Abbamonte P 2017 *Science* **358** 1314
 [8] Lin Z, Wang C, Balassis A, Echeverry J P, Vasenko A S, Silkin V M, Chulkov E V, Shi Y, Zhang J, Guo J, Zhu X 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 187601
 [9] Jia Y, Wang P, Chiu C L, Song Z, Yu G, Jäck B, Lei S, Klemenz S, Cevallos F A, Onyszczyk M, Fishchenko N, Liu X, Farahi G, Xie F, Xu Y, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Cava R J, Schoop L M, Yazdani A, Wu S 2022 *Nat. Phys.* **18** 87
 [10] Sun B, Zhao W, Palomaki T, Fei Z, Runburg E, Malinowski P, Huang X, Cenker J, Cui Y T, Chu J H, Xu X, Ataei S S, Varsano D, Palumbo M, Molinari E, Rontani M, Cobden D H 2022 *Nat. Phys.* **18** 94
 [11] Bucher B, Steiner P, Wächter P 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2717
 [12] Du L, Li X, Lou W, Sullivan G, Chang K, Kono J, Du R R 2017 *Nat. Commun.* **8** 1971
 [13] Mazza G, Rösner M, Windgätter L, Latini S, Hübener H, Millis A J, Rubio A, Georges A 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 197601
 [14] Baldini E, Zong A, Choi D, Lee C, Michael M H, Windgätter L, Mazin I I, Latini S, Azoury D, Lv B, Kogar A, Wang Y, Lu Y, Takayama T, Takagi H, Millis A J, Rubio A, Demler E, Gedik N 2020 arXiv 2007.02909 [cond-mat.str-el]
 [15] Suen Y W, Engel L W, Santos M B, Shayegan M, Tsui D C 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 1379
 [16] Spielman I B, Eisenstein J P, Pfeiffer L N, West K W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5808
 [17] Kellogg M, Spielman I B, Eisenstein J P, Pfeiffer L N, West K W 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 126804
 [18] Eisenstein J P, MacDonald A H 2004 *Nature* **432** 691
 [19] Eisenstein J P 2014 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **5** 159
 [20] Wang L, Meric I, Huang P Y, Gao Q, Gao Y, Tran H, Taniguchi T, Watanabe K, Campos L M, Muller D A, Guo J, Kim P, Hone J, Shepard K L, Dean C R 2013 *Science* **342** 614
 [21] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A, Castro Neto A H 2016 *Science* **353** aac9439
 [22] Li J I A, Taniguchi T, Watanabe K, Hone J, Dean C R 2017 *Nat. Phys.* **13** 751
 [23] Liu X, Watanabe K, Taniguchi T, Halperin B I, Kim P 2017 *Nat. Phys.* **13** 746
 [24] Liu X, Li J I A, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Halperin B I, Kim P, Dean C R 2022 *Science* **375** 205
 [25] Yu H, Liu G B, Tang J, Xu X, Yao W 2017 *Sci. Adv.* **3** e1701696
 [26] Li G, Luican A, Lopes dos Santos J M B, Castro Neto A H, Reina A, Kong J, Andrei E Y 2010 *Nat. Phys.* **6** 109
 [27] Bistritzer R, MacDonald A H 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **108** 12233
 [28] Wu F, Lovorn T, MacDonald A H 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 147401
 [29] Cao Y, Fatemi V, Demir A, Fang S, Tomarken S L, Luo J Y, Sanchez-Yamagishi J D, Watanabe K, Taniguchi T, Kaxiras E, Ashoori R C, Jarillo-Herrero P 2018 *Nature* **556** 80
 [30] Cao Y, Fatemi V, Fang S, Watanabe K, Taniguchi T, Kaxiras E, Jarillo-Herrero P 2018 *Nature* **556** 43
 [31] Chittari B L, Chen G, Zhang Y, Wang F, Jung J 2019 *Phys.*

- Rev. Lett.* **122** 016401
- [32] Alexeev E M, Ruiz-Tijerina D A, Danovich M, Hamer M J, Terry D J, Nayak P K, Ahn S, Pak S, Lee J, Sohn J I, Molas M R, Koperski M, Watanabe K, Taniguchi T, Novoselov K S, Gorbachev R V, Shin H S, Fal'ko V I, Tartakovskii A I **2019** *Nature* **567** 81
- [33] Jin C, Regan E C, Yan A, Iqbal Bakti Utama M, Wang D, Zhao S, Qin Y, Yang S, Zheng Z, Shi S, Watanabe K, Taniguchi T, Tongay S, Zettl A, Wang F **2019** *Nature* **567** 76
- [34] Seyler K L, Rivera P, Yu H, Wilson N P, Ray E L, Mandrus D G, Yan J, Yao W, Xu X **2019** *Nature* **567** 66
- [35] Tran K, Moody G, Wu F, Lu X, Choi J, Kim K, Rai A, Sanchez D A, Quan J, Singh A, Embley J, Zepeda A, Campbell M, Autry T, Taniguchi T, Watanabe K, Lu N, Banerjee S K, Silverman K L, Kim S, Tutuc E, Yang L, MacDonald A H, Li X **2019** *Nature* **567** 71
- [36] Chen G, Jiang L, Wu S, Lyu B, Li H, Chittari B L, Watanabe K, Taniguchi T, Shi Z, Jung J, Zhang Y, Wang F **2019** *Nat. Phys.* **15** 237
- [37] Yankowitz M, Chen S, Polshyn H, Zhang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Graf D, Young A F, Dean C R **2019** *Science* **363** 1059
- [38] Yoo H, Engelke R, Carr S, Fang S, Zhang K, Cazeaux P, Sung S H, Hovden R, Tsen A W, Taniguchi T, Watanabe K, Yi G C, Kim M, Luskin M, Tadmor E B, Kaxiras E, Kim P **2019** *Nat. Mater.* **18** 448
- [39] Tomarken S L, Cao Y, Demir A, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P, Ashoori R C **2019** *Phys. Rev. Lett.* **123** 046601
- [40] Chen G, Sharpe A L, Gallagher P, Rosen I T, Fox E J, Jiang L, Lyu B, Li H, Watanabe K, Taniguchi T, Jung J, Shi Z, Goldhaber-Gordon D, Zhang Y, Wang F **2019** *Nature* **572** 215
- [41] Kerelsky A, McGilly L J, Kennes D M, Xian L, Yankowitz M, Chen S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Dean C, Rubio A, Pasupathy A N **2019** *Nature* **572** 95
- [42] Xie Y, Lian B, Jäck B, Liu X, Chiu C L, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Yazdani A **2019** *Nature* **572** 101
- [43] Sharpe A L, Fox E J, Barnard A W, Finney J, Watanabe K, Taniguchi T, Kastner M A, Goldhaber-Gordon D **2019** *Science* **365** 605
- [44] Jiang Y, Lai X, Watanabe K, Taniguchi T, Haule K, Mao J, Andrei E Y **2019** *Nature* **573** 91
- [45] Lu X, Stepanov P, Yang W, Xie M, Aamir M A, Das I, Urgell C, Watanabe K, Taniguchi T, Zhang G, Bachtold A, MacDonald A H, Efetov D K **2019** *Nature* **574** 653
- [46] Polshyn H, Yankowitz M, Chen S, Zhang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Dean C R, Young A F **2019** *Nat. Phys.* **15** 1011
- [47] Choi Y, Kemmer J, Peng Y, Thomson A, Arora H, Polski R, Zhang Y, Ren H, Alicea J, Refael G, von Oppen F, Watanabe K, Taniguchi T, Nadj-Perge S **2019** *Nat. Phys.* **15** 1174
- [48] Finney N R, Yankowitz M, Muralatharan L, Watanabe K, Taniguchi T, Dean C R, Hone J **2019** *Nat. Nanotechnol.* **14** 1029
- [49] Jin C, Regan E C, Wang D, Iqbal Bakti Utama M, Yang C S, Cain J, Qin Y, Shen Y, Zheng Z, Watanabe K, Taniguchi T, Tongay S, Zettl A, Wang F **2019** *Nat. Phys.* **15** 1140
- [50] Burg G W, Zhu J, Taniguchi T, Watanabe K, MacDonald A H, Tutuc E **2019** *Phys. Rev. Lett.* **123** 197702
- [51] Karni O, Barré E, Lau S C, Gillen R, Ma E Y, Kim B, Watanabe K, Taniguchi T, Maultzsch J, Barmak K, Page R H, Heinz T F **2019** *Phys. Rev. Lett.* **123** 247402
- [52] Lu X, Tang J, Wallbank J R, Wang S, Shen C, Wu S, Chen P, Yang W, Zhang J, Watanabe K, Taniguchi T, Yang R, Shi D, Efetov D K, Fal'ko V I, Zhang G **2020** *Phys. Rev. B* **102** 045409
- [53] Cao Y, Chowdhury D, Rodan-Legrain D, Rubies-Bigorda O, Watanabe K, Taniguchi T, Senthil T, Jarillo-Herrero P **2020** *Phys. Rev. Lett.* **124** 076801
- [54] Serlin M, Tschirhart C L, Polshyn H, Zhang Y, Zhu J, Watanabe K, Taniguchi T, Balents L, Young A F **2020** *Science* **367** 900
- [55] Chen G, Sharpe A L, Fox E J, Zhang Y H, Wang S, Jiang L, Lyu B, Li H, Watanabe K, Taniguchi T, Shi Z, Senthil T, Goldhaber-Gordon D, Zhang Y, Wang F **2020** *Nature* **579** 56
- [56] Regan E C, Wang D, Jin C, Bakti Utama M I, Gao B, Wei X, Zhao S, Zhao W, Zhang Z, Yumigeta K, Blei M, Carlström J D, Watanabe K, Taniguchi T, Tongay S, Crommie M, Zettl A, Wang F **2020** *Nature* **579** 359
- [57] Tang Y, Li L, Li T, Xu Y, Liu S, Barmak K, Watanabe K, Taniguchi T, MacDonald A H, Shan J, Mak K F **2020** *Nature* **579** 353
- [58] Shimazaki Y, Schwartz I, Watanabe K, Taniguchi T, Kroner M, Imamoğlu A **2020** *Nature* **580** 472
- [59] Shen C, Chu Y, Wu Q, Li N, Wang S, Zhao Y, Tang J, Liu J, Tian J, Watanabe K, Taniguchi T, Yang R, Meng Z Y, Shi D, Yazeyev O V, Zhang G **2020** *Nat. Phys.* **16** 520
- [60] Uri A, Grover S, Cao Y, Crosse J A, Bagani K, Rodan-Legrain D, Myasoedov Y, Watanabe K, Taniguchi T, Moon P, Koshino M, Jarillo-Herrero P, Zeldov E **2020** *Nature* **581** 47
- [61] Wong D, Nuckolls K P, Oh M, Lian B, Xie Y, Jeon S, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Yazdani A **2020** *Nature* **582** 198
- [62] Zondiner U, Rozen A, Rodan-Legrain D, Cao Y, Queiroz R, Taniguchi T, Watanabe K, Oreg Y, von Oppen F, Stern A, Berg E, Jarillo-Herrero P, Ilani S **2020** *Nature* **582** 203
- [63] Arora H S, Polski R, Zhang Y, Thomson A, Choi Y, Kim H, Lin Z, Wilson I Z, Xu X, Chu J H, Watanabe K, Taniguchi T, Alicea J, Nadj-Perge S **2020** *Nature* **583** 379
- [64] Cao Y, Rodan-Legrain D, Rubies-Bigorda O, Park J M, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P **2020** *Nature* **583** 215
- [65] Liu X, Hao Z, Khalaf E, Lee J Y, Ronen Y, Yoo H, Haei Najafabadi D, Watanabe K, Taniguchi T, Vishwanath A, Kim P **2020** *Nature* **583** 221
- [66] McGilly L J, Kerelsky A, Finney N R, Shapovalov K, Shih E M, Ghiotto A, Zeng Y, Moore S L, Wu W, Bai Y, Watanabe K, Taniguchi T, Stengel M, Zhou L, Hone J, Zhu X, Basov D N, Dean C, Dreyer C E, Pasupathy A N **2020** *Nat. Nanotechnol.* **15** 580
- [67] Stepanov P, Das I, Lu X, Fahimniya A, Watanabe K, Taniguchi T, Koppens F H L, Lischner J, Levitov L, Efetov D K **2020** *Nature* **583** 375
- [68] Wang L, Shih E M, Ghiotto A, Xian L, Rhodes D A, Tan C, Claassen M, Kennes D M, Bai Y, Kim B, Watanabe K, Taniguchi T, Zhu X, Hone J, Rubio A, Pasupathy A N, Dean C R **2020** *Nat. Mater.* **19** 861
- [69] Saito Y, Ge J, Watanabe K, Taniguchi T, Young A F **2020** *Nat. Phys.* **16** 926
- [70] Bai Y, Zhou L, Wang J, Wu W, McGilly L J, Halbertal D, Lo C F B, Liu F, Ardelean J, Rivera P, Finney N R, Yang X C, Basov D N, Yao W, Xu X, Hone J, Pasupathy A N,

- Zhu X Y 2020 *Nat. Mater.* **19** 1068
- [71] Chu Z, Regan E C, Ma X, Wang D, Xu Z, Utama M I B, Yumigeta K, Blei M, Watanabe K, Taniguchi T, Tongay S, Wang F, Lai K 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 186803
- [72] Xu Y, Liu S, Rhodes D A, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Elser V, Mak K F, Shan J 2020 *Nature* **587** 214
- [73] Zhang Z, Wang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Ueno K, Tutuc E, LeRoy B J 2020 *Nat. Phys.* **16** 1093
- [74] Zhang L, Zhang Z, Wu F, Wang D, Gogna R, Hou S, Watanabe K, Taniguchi T, Kulkarni K, Kuo T, Forrest S R, Deng H 2020 *Nat. Commun.* **11** 5888
- [75] Nuckolls K P, Oh M, Wong D, Lian B, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Yazdani A 2020 *Nature* **588** 610
- [76] Polshyn H, Zhu J, Kumar M A, Zhang Y, Yang F, Tschirhart C L, Serlin M, Watanabe K, Taniguchi T, MacDonald A H, Young A F 2020 *Nature* **588** 66
- [77] Lee K, Utama M I B, Kahn S, Samudrala A, Leconte N, Yang B, Wang S, Watanabe K, Taniguchi T, Altoé M V P, Zhang G, Weber-Bargioni A, Crommie M, Ashby P D, Jung J, Wang F, Zettl A 2020 *Sci. Adv.* **6** eabd1919
- [78] He M, Li Y, Cai J, Liu Y, Watanabe K, Taniguchi T, Xu X, Yankowitz M 2021 *Nat. Phys.* **17** 26
- [79] Tang Y, Gu J, Liu S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Mak K F, Shan J 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 52
- [80] Park J M, Cao Y, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P 2021 *Nature* **590** 249
- [81] Utama M I B, Koch R J, Lee K, Leconte N, Li H, Zhao S, Jiang L, Zhu J, Watanabe K, Taniguchi T, Ashby P D, Weber-Bargioni A, Zettl A, Jozwiak C, Jung J, Rotenberg E, Bostwick A, Wang F 2021 *Nat. Phys.* **17** 184
- [82] Chen S, He M, Zhang Y H, Hsieh V, Fei Z, Watanabe K, Taniguchi T, Cobden D H, Xu X, Dean C R, Yankowitz M 2021 *Nat. Phys.* **17** 374
- [83] Zhang L, Wu F, Hou S, Zhang Z, Chou Y H, Watanabe K, Taniguchi T, Forrest S R, Deng H 2021 *Nature* **591** 61
- [84] Hao Z, Zimmerman A M, Ledwith P, Khalaf E, Najafabadi D H, Watanabe K, Taniguchi T, Vishwanath A, Kim P 2021 *Science* **371** 1133
- [85] Liu X, Wang Z, Watanabe K, Taniguchi T, Vafek O, Li J I A 2021 *Science* **371** 1261
- [86] Park J M, Cao Y, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P 2021 *Nature* **592** 43
- [87] Rozen A, Park J M, Zondiner U, Cao Y, Rodan-Legrain D, Taniguchi T, Watanabe K, Oreg Y, Stern A, Berg E, Jarillo-Herrero P, Ilani S 2021 *Nature* **592** 214
- [88] Saito Y, Ge J, Rademaker L, Watanabe K, Taniguchi T, Abanin D A, Young A F 2021 *Nat. Phys.* **17** 478
- [89] Saito Y, Yang F, Ge J, Liu X, Taniguchi T, Watanabe K, Li J I A, Berg E, Young A F 2021 *Nature* **592** 220
- [90] Han T, Yang J, Zhang Q, Wang L, Watanabe K, Taniguchi T, McEuen P L, Ju L 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 146402
- [91] Cao Y, Rodan-Legrain D, Park J M, Yuan N F Q, Watanabe K, Taniguchi T, Fernandes R M, Fu L, Jarillo-Herrero P 2021 *Science* **372** 264
- [92] Li Y, Dietrich S, Forsythe C, Taniguchi T, Watanabe K, Moon P, Dean C R 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 525
- [93] Xu S, Al Ezzi M M, Balakrishnan N, Garcia-Ruiz A, Tsim B, Mullan C, Barrier J, Xin N, Piot B A, Taniguchi T, Watanabe K, Carvalho A, Mishchenko A, Geim A K, Fal'ko V I, Adam S, Neto A H C, Novoselov K S, Shi Y 2021 *Nat. Phys.* **17** 619
- [94] Xu Y, Horn C, Zhu J, Tang Y, Ma L, Li L, Liu S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J C, Shan J, Mak K F 2021 *Nat. Mater.* **20** 645
- [95] Liu X, Chiu C L, Lee J Y, Farahi G, Watanabe K, Taniguchi T, Vishwanath A, Yazdani A 2021 *Nat. Commun.* **12** 2732
- [96] Sharpe A L, Fox E J, Barnard A W, Finney J, Watanabe K, Taniguchi T, Kastner M A, Goldhaber-Gordon D 2021 *Nano Lett.* **21** 4299
- [97] Das I, Lu X, Herzog-Arbeitman J, Song Z D, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Efetov D K 2021 *Nat. Phys.* **17** 710
- [98] Huang X, Wang T, Miao S, Wang C, Li Z, Lian Z, Taniguchi T, Watanabe K, Okamoto S, Xiao D, Shi S F, Cui Y T 2021 *Nat. Phys.* **17** 715
- [99] Liu E, Barré E, van Baren J, Wilson M, Taniguchi T, Watanabe K, Cui Y T, Gabor N M, Heinz T F, Chang Y C, Lui C H 2021 *Nature* **594** 46
- [100] Shabani S, Halbertal D, Wu W, Chen M, Liu S, Hone J, Yao W, Basov D N, Zhu X, Pasupathy A N 2021 *Nat. Phys.* **17** 720
- [101] Tschirhart C L, Serlin M, Polshyn H, Shragai A, Xia Z, Zhu J, Zhang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Huber M E, Young A F 2021 *Science* **372** 1323
- [102] Cao Y, Park J M, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P 2021 *Nature* **595** 526
- [103] Jin C, Tao Z, Li T, Xu Y, Tang Y, Zhu J, Liu S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J C, Fu L, Shan J, Mak K F 2021 *Nat. Mater.* **20** 940
- [104] Li H, Li S, Naik M H, Xie J, Li X, Wang J, Regan E, Wang D, Zhao W, Zhao S, Kahn S, Yumigeta K, Blei M, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Zettl A, Louie S G, Wang F, Crommie M F 2021 *Nat. Mater.* **20** 945
- [105] Rodan-Legrain D, Cao Y, Park J M, de la Barrera S C, Randeria M T, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 769
- [106] Quan J, Linhart L, Lin M L, Lee D, Zhu J, Wang C Y, Hsu W T, Choi J, Embley J, Young C, Taniguchi T, Watanabe K, Shih C K, Lai K, MacDonald A H, Tan P H, Libisch F, Li X 2021 *Nat. Mater.* **20** 1100
- [107] He M, Zhang Y H, Li Y, Fei Z, Watanabe K, Taniguchi T, Xu X, Yankowitz M 2021 *Nat. Commun.* **12** 4727
- [108] Ghiotto A, Shih E M, Pereira G S S G, Rhodes D A, Kim B, Zang J, Millis A J, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J C, Wang L, Dean C R, Pasupathy A N 2021 *Nature* **597** 345
- [109] Li T, Jiang S, Li L, Zhang Y, Kang K, Zhu J, Watanabe K, Taniguchi T, Chowdhury D, Fu L, Shan J, Mak K F 2021 *Nature* **597** 350
- [110] Li H, Li S, Regan E C, Wang D, Zhao W, Kahn S, Yumigeta K, Blei M, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Zettl A, Crommie M F, Wang F 2021 *Nature* **597** 650
- [111] Hesp N C H, Torre I, Rodan-Legrain D, Novelli P, Cao Y, Carr S, Fang S, Stepanov P, Barcons-Ruiz D, Herzig Sheinfux H, Watanabe K, Taniguchi T, Efetov D K, Kaxiras E, Jarillo-Herrero P, Polini M, Koppens F H L 2021 *Nat. Phys.* **17** 1162
- [112] Li H, Li S, Naik M H, Xie J, Li X, Regan E, Wang D, Zhao W, Yumigeta K, Blei M, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Zettl A, Louie S G, Crommie M F, Wang F 2021 *Nat. Phys.* **17** 1114
- [113] Li T, Zhu J, Tang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Elser V, Shan J, Mak K F 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 1068
- [114] Zhou H, Xie T, Ghazaryan A, Holder T, Ehrets J R, Spanton E M, Taniguchi T, Watanabe K, Berg E, Serbyn M, Young A F 2021 *Nature* **598** 429

- [115] Zhou H, Xie T, Taniguchi T, Watanabe K, Young A F 2021 *Nature* **598** 434
- [116] Pierce A T, Xie Y, Park J M, Khalaf E, Lee S H, Cao Y, Parker D E, Forrester P R, Chen S, Watanabe K, Taniguchi T, Vishwanath A, Jarillo-Herrero P, Yacoby A 2021 *Nat. Phys.* **17** 1210
- [117] Wang X, Zhu J, Seyler K L, Rivera P, Zheng H, Wang Y, He M, Taniguchi T, Watanabe K, Yan J, Mandrus D G, Gamelin D R, Yao W, Xu X 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 1208
- [118] Song T, Sun Q C, Anderson E, Wang C, Qian J, Taniguchi T, Watanabe K, McGuire M A, Stöhr R, Xiao D, Cao T, Wrachtrup J, Xu X 2021 *Science* **374** 1140
- [119] Choi Y, Kim H, Lewandowski C, Peng Y, Thomson A, Polski R, Zhang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Alicea J, Nadj-Perge S 2021 *Nat. Phys.* **17** 1375
- [120] Li T, Jiang S, Shen B, Zhang Y, Li L, Tao Z, Devakul T, Watanabe K, Taniguchi T, Fu L, Shan J, Mak K F 2021 *Nature* **600** 641
- [121] Oh M, Nuckolls K P, Wong D, Lee R L, Liu X, Watanabe K, Taniguchi T, Yazdani A 2021 *Nature* **600** 240
- [122] Xie Y, Pierce A T, Park J M, Parker D E, Khalaf E, Ledwith P, Cao Y, Lee S H, Chen S, Forrester P R, Watanabe K, Taniguchi T, Vishwanath A, Jarillo-Herrero P, Yacoby A 2021 *Nature* **600** 439
- [123] Polshyn H, Zhang Y, Kumar M A, Soejima T, Ledwith P, Watanabe K, Taniguchi T, Vishwanath A, Zaletel M P, Young A F 2022 *Nat. Phys.* **18** 42
- [124] Wang Y, Herzog-Arbeitman J, Burg G W, Zhu J, Watanabe K, Taniguchi T, MacDonald A H, Bernevig B A, Tutuc E 2022 *Nat. Phys.* **18** 48
- [125] Lin J X, Zhang Y H, Morissette E, Wang Z, Liu S, Rhodes D, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Li J I A 2022 *Science* **375** 437
- [126] Xu Y, Ray A, Shao Y T, Jiang S, Lee K, Weber D, Goldberger J E, Watanabe K, Taniguchi T, Muller D A, Mak K F, Shan J 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 143
- [127] Zhou H, Holleis L, Saito Y, Cohen L, Huynh W, Patterson C L, Yang F, Taniguchi T, Watanabe K, Young A F 2022 *Science* **375** 774
- [128] Karni O, Barré E, Pareek V, Georgaras J D, Man M K L, Sahoo C, Bacon D R, Zhu X, Ribeiro H B, O'Beirne A L, Hu J, Al-Mahboob A, Abdelrasoul M M M, Chan N S, Karmakar A, Winchester A J, Kim B, Watanabe K, Taniguchi T, Barmak K, Madéo J, da Jornada F H, Heinz T F, Dani K M 2022 *Nature* **603** 247
- [129] Yang J, Chen G, Han T, Zhang Q, Zhang Y H, Jiang L, Lyu B, Li H, Watanabe K, Taniguchi T, Shi Z, Senthil T, Zhang Y, Wang F, Ju L 2022 *Science* **375** 1295
- [130] Wang X, Xiao C, Park H, Zhu J, Wang C, Taniguchi T, Watanabe K, Yan J, Xiao D, Gamelin D R, Yao W, Xu X 2022 *Nature* **604** 468
- [131] Li Q, Cheng B, Chen M, Xie B, Xie Y, Wang P, Chen F, Liu Z, Watanabe K, Taniguchi T, Liang S J, Wang D, Wang C, Wang Q H, Liu J, Miao F 2022 *Nature* **609** 479
- [132] Turkel S, Swann J, Zhu Z, Christos M, Watanabe K, Taniguchi T, Sachdev S, Scheurer M S, Kaxiras E, Dean C R, Pasupathy A N 2022 *Science* **376** 193
- [133] Finney J, Sharpe A L, Fox E J, Hsueh C L, Parker D E, Yankowitz M, Chen S, Watanabe K, Taniguchi T, Dean C R, Vishwanath A, Kastner M A, Goldhaber-Gordon D 2022 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **119** e2118482119
- [134] Barré E, Karni O, Liu E, O'Beirne A L, Chen X, Ribeiro H B, Yu L, Kim B, Watanabe K, Taniguchi T, Barmak K, Lui C H, Refaely-Abramson S, da Jornada F H, Heinz T F 2022 *Science* **376** 406
- [135] Liu X, Zhang N J, Watanabe K, Taniguchi T, Li J I A 2022 *Nat. Phys.* **18** 522
- [136] Jaoui A, Das I, Di Battista G, et al. 2022 *Nat. Phys.* **18** 633
- [137] Kim H, Choi Y, Lewandowski C, Thomson A, Zhang Y, Polski R, Watanabe K, Taniguchi T, Alicea J, Nadj-Perge S 2022 *Nature* **606** 494
- [138] Liu L, Zhang S, Chu Y, Shen C, Huang Y, Yuan Y, Tian J, Tang J, Ji Y, Yang R, Watanabe K, Taniguchi T, Shi D, Liu J, Yang W, Zhang G 2022 *Nat. Commun.* **13** 3292
- [139] de la Barrera S C, Aronson S, Zheng Z, Watanabe K, Taniguchi T, Ma Q, Jarillo-Herrero P, Ashoori R 2022 *Nat. Phys.* **18** 771
- [140] Zhao W, Kang K, Li L, Tschirhart C, Redekop E, Watanabe K, Taniguchi T, Young A, Shan J, Mak K F 2022 *arXiv* 2207.02312 [cond-mat. mes-hall]
- [141] Tang Y, Gu J, Liu S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J C, Mak K F, Shan J 2022 *Nat. Commun.* **13** 4271
- [142] Burg G W, Khalaf E, Wang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Tutuc E 2022 *Nat. Mater.* **21** 884
- [143] Park J M, Cao Y, Xia L Q, Sun S, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P 2022 *Nat. Mater.* **21** 877
- [144] Naik M H, Regan E C, Zhang Z, et al. 2022 *Nature* **609** 52
- [145] Xu Y, Kang K, Watanabe K, Taniguchi T, Mak K F, Shan J 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 934
- [146] Lin J X, Siriviboon P, Scammell H D, Liu S, Rhodes D, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Scheurer M S, Li J I A 2022 *Nat. Phys.* **18** 1221
- [147] Zhao W, Shen B, Tao Z, Han Z, Kang K, Watanabe K, Taniguchi T, Mak K F, Shan J 2022 *arXiv* 2211.00263 [cond-mat. str-el]
- [148] Zhang M, Zhao X, Watanabe K, Taniguchi T, Zhu Z, Wu F, Li Y, Xu Y 2022 *Phys. Rev. X* **12** 041015
- [149] Susarla S, Naik M H, Blach D D, Zipfel J, Taniguchi T, Watanabe K, Huang L, Ramesh R, da Jornada F H, Louie S G, Ercius P, Raja A 2022 *Science* **378** 1235
- [150] Sood A, Haber J B, Carlström J, et al. 2023 *Nat. Nanotechnol.* **18** 29
- [151] Shen C, Ledwith P J, Watanabe K, Taniguchi T, Khalaf E, Vishwanath A, Efetov D K 2023 *Nat. Mater.* **22** 316
- [152] Lau C N, Bockrath M W, Mak K F, Zhang F 2022 *Nature* **602** 41
- [153] Zhang Z, Regan E C, Wang D, et al. 2022 *Nat. Phys.* **18** 1214
- [154] Gu J, Ma L, Liu S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J C, Shan J, Mak K F 2022 *Nat. Phys.* **18** 395
- [155] Chen D, Lian Z, Huang X, et al. 2022 *Nat. Phys.* **18** 1171
- [156] Shi Q, Shih E M, Rhodes D, Kim B, Barmak K, Watanabe K, Taniguchi T, Papić Z, Abanin D A, Hone J, Dean C R 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 577
- [157] Zeng Y, Xia Z, Dery R, Watanabe K, Taniguchi T, Shan J, Mak K F 2023 *Nat. Mater.* **22** 175
- [158] Ma L, Nguyen P X, Wang Z, Zeng Y, Watanabe K, Taniguchi T, MacDonald A H, Mak K F, Shan J 2021 *Nature* **598** 585
- [159] Peelaers H, Van de Walle C G 2012 *Phys. Rev. B* **86** 241401
- [160] Raymond A, Robert J L, Bernard C 1979 *J. Phys. C Solid State Phys.* **12** 2289
- [161] Fogler M M, Butov L V, Novoselov K S 2014 *Nat. Commun.* **5** 4555
- [162] Wu F C, Xue F, MacDonald A H 2015 *Phys. Rev. B* **92** 165121

- [163] Wang Z, Rhodes D A, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J C, Shan J, Mak K F 2019 *Nature* **574** 76
- [164] Zhang Y H, Sheng D N, Vishwanath A 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 247701
- [165] Zeng Y, Wei N, MacDonald A H 2022 *Phys. Rev. B* **106** 165105
- [166] Xiong R, Nie J H, Brantly S L, Hays P, Sailus R, Watanabe K, Taniguchi T, Tongay S, Jin C 2022 arXiv 2207.10764 [cond-mat. str-el]
- [167] Bai Y, Liu S, Guo Y, Pack J, Wang J, Dean C R, Hone J, Zhu X Y 2022 arXiv 2207.09601 [cond-mat. mes-hall]

SPECIAL TOPIC—Two dimensional twisted moiré superlattice

Exciton insulator in a moiré lattice

Gu Jie ^{1)†} Ma Li-Guo ^{2)‡}

1) (*State Key Laboratory of Surface Physics, Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

2) (*School of Applied and Engineering Physics, Cornell University, Ithaca 14850, USA*)

(Received 16 January 2023; revised manuscript received 9 February 2023)

Abstract

Interlayer electron and hole can be paired up through coulomb interaction to form an exciton insulator when their kinetic energy is substantially smaller than the interaction energy. The traditional platform to realize such an interlayer interaction is the double quantum well with dielectric material between electron and hole, for which an external magnetic field is required to generate Landau level flat bands that can reduce the kinetic energy of charged carriers. When both quantum wells are at the half filling of the lowest Landau level, the electron-electron repulsive interaction, by the particle-hole transformation in one well, will be equivalent to electron-hole attractive interaction, from which interlayer exciton and its condensation can emerge. In a two-dimensional twisted homostructure or an angle aligned heterostructure, there exists a moiré superlattice, in which bands are folded into the mini-Brillouin zone by the large moiré period. Gap opening at the boundary of mini-Brillouin zone can form the well-known moiré flat band. This review will discuss how to use the moiré flat bands to generate exciton insulator in the absence of external magnetic field in transitional metal dichalcogenide (TMD) moiré heterostructure. Unlike the double quantum well where symmetric well geometry is used, the moiré related sample can have multiple different geometries, including monolayer TMD-hexagonal boron nitride-moiré structure, moiré-moiré structure, and monolayer TMD-bilayer TMD structure. The carriers in those structures can be well tuned to locate equally in different layers, and particle-hole transformation in the moiré first Hubbard band can transform the interlayer repulsive coulomb interaction into attractive interaction, which is the same as that in quantum well under magnetic field. We will show that by using differential contrast reflection spectrum, interlayer photoluminescence, 2s exciton sensing, quantum capacitance and microwave impedance microscopy, the signature of exciton fluid can be identified. The excitonic coherence features in those structures will promise by using the coulomb drag technique and counter flow technique in future. In general, exciton in moiré lattice is a promising candidate for studying the Bose-Hubbard model in solids and can well realize exciton superfluidity, excitonic mott insulator as well as the crossover between them.

Keywords: exciton insulator, moiré lattice, flat band, two-dimensional semiconductor

PACS: 71.35.Lk, 71.27.+a, 71.35.-y, 73.21.Cd

DOI: 10.7498/aps.72.20230079

† Corresponding author. E-mail: gujielog@fudan.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: liguo.ma@cornell.edu



莫尔晶格中的激子绝缘体

古杰 马立国

Exciton insulator in a moiré lattice

Gu Jie Ma Li-Guo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 067101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230079

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230079>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维材料平带的实现及其新奇量子物态

Flat bands and related novel quantum states in two-dimensional systems

物理学报. 2022, 71(12): 127302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220225>

二维范德瓦耳斯半导体莫尔超晶格实验研究进展

Recent experimental research progress of two-dimensional van der Waals semiconductor moiré superlattices

物理学报. 2022, 71(12): 127309 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220347>

转角二维量子材料中平带相关的新奇电子态物性

Physical properties of novel electronic states related to flat band in twisted two-dimensional quantum materials

物理学报. 2022, 71(12): 127202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220064>

一维螺旋型Se原子链中的Rashba效应和平带性质

Rashba effect and flat band property in one-dimensional helical Se atomic chain

物理学报. 2022, 71(14): 147102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220646>

石墨烯莫尔超晶格的晶格弛豫与衬底效应

Lattice relaxation and substrate effects of graphene moiré superlattice

物理学报. 2022, 71(18): 187302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220872>

电场调控双层WSe₂转角同质结激子莫尔势

Exciton moiré potential in twisted WSe₂ homobilayers modulated by electric field

物理学报. 2022, 71(17): 177301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220664>